

Artículo Científico / Scientific Article

Análisis de la calidad de agua en manantiales volcánicos para abastecimiento de agua para consumo humano

Analysis of Water Quality in Volcanic Springs for Human Consumption Supply

Sammy Francisco Hernández Aviles.¹ 

¹Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala

Dirección para recibir correspondencia: sahernandezaviles@gmail.com

Recibido: 25/01/2023

Revisión: 25/04/2023

Aceptado: 13/10/2023

Resumen

La aldea Panimaché I y la aldea Panimaché II son comunidades instaladas en las faldas del Volcán de Fuego; en donde el abastecimiento de agua potable se ve afectado durante cada actividad volcánica, tanto a nivel de infraestructura de abastecimiento como a nivel de calidad de agua. En el caso del agua utilizada para consumo humano y para riego, se tiene que es producida por uno de los manantiales ubicados en terrenos municipales en la parte noreste del tanque de distribución. Para el actual estudio, fueron monitoreados los siguientes parámetros de posible contaminación geogénica: Cloruros (Cl⁻), Fluoruros (F⁻), Sulfato (SO₄²⁻), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Boro (B) y Arsénico (As); en las cajas de captación de los manantiales que abastecen a Panimaché I y a Panimaché II con el objetivo de establecer una línea base para el análisis de la calidad de agua en manantiales volcánicos con respecto a la contaminación geogénica en estos acuíferos y su respectiva comparación con la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001 donde establece los Límites Máximos Permisibles del agua para consumo humano en Guatemala. Los datos obtenidos mostraron que los parámetros muestreados que fueron medidos dentro del rango de detección del equipo utilizado (Boro y Sulfato), presentan concentraciones menores a los límites máximos permisibles establecidos en la normativa guatemalteca para agua potable, con una mediana de 0.20 miligramos por litro para el boro y de 8.255 para el Sulfato.

Palabras claves: acuíferos volcánicos, aniones, Boro, cationes, toxicología.

Abstract

Panimaché I and Panimaché II villages are communities situated on the slopes of the Volcán de Fuego, where the potable water supply is affected during each volcanic activity, impacting both the supply infrastructure and water quality. The water used for human consumption and irrigation is sourced from one of the springs located on municipal lands in the northeastern part of the distribution tank. For the current study, the following parameters of potential geogenic contamination were monitored: Chlorides (Cl⁻), Fluorides (F⁻), Sulfate (SO₄²⁻), Manganese (Mn), Iron (Fe), Boron (B), and Arsenic (As). These were measured at the intake boxes of the springs that supply Panimaché I and Panimaché II with the aim of establishing a baseline for analyzing water quality in volcanic springs concerning geogenic contamination in these aquifers and comparing it with the Guatemalan Technical Standard COGUANOR 29001, which establishes the Maximum Permissible Limits for water intended for human consumption in Guatemala. The data obtained showed that the parameters measured in this study, which were within the detection range of the equipment used (Boron and Sulfate), presented concentrations below the Maximum Permissible Limits established in the Guatemalan standard for drinking water, with a median of 0.20 milligrams per liter for Boron and 8.255 milligrams per liter for Sulfate.

Key words: volcanic aquifers, anions, Boron, cations, toxicology.



Introducción

En las aguas subterráneas se tiene la presencia de solutos disueltos, que se originan por distintos factores derivados de las precipitaciones en distintas temporalidades, meteoros atmosféricos, reacciones orgánicas e inorgánicas que suceden en los suelos al interactuar con el agua, meteorización del medio poroso y los aportes de las actividades antropogénicas (Appelo & Postma, 2005). La composición hidro química de las aguas subterráneas cercanas a la superficie, es similar a la que tiene el agua de lluvia, cuando éstas llegan al acuífero profundo luego del proceso de infiltración y percolación a través de la zona no saturada, son otros los factores que rigen las características hidro química que tendrá el agua subterránea (Custodio & Llamas, 1996).

En el caso de los acuíferos que son volcánicos compuestos de flujos rocosos con petrografía andesítica normalmente están altamente fracturados y por tal razón presentan una alta porosidad secundaria. Esta porosidad se forma debido a un proceso geológico posterior a la disposición del material del estrato o capa.

Las fracturas se presentan en la roca debido a cambios bruscos en la temperatura del terreno. Este último proceso se conoce como milonitización y consiste en trituración de la roca adyacente a la falla geológica (Batres, 2016).

La composición mineralógica de los suelos, la permeabilidad primaria y secundaria, la presencia de gases endógenos como el CO₂, condicionan las características hidro químicas del agua subterránea, en términos del tiempo de contacto e interacción entre el agua y los suelos que conforman el acuífero profundo (Custodio & Llamas, 1996).

Entre todos los contaminantes inorgánicos, el agua subterránea puede contener concentraciones de Arsénico y Fluoruro, la mayor amenaza para la salud humana. En las aguas subterráneas, estos contaminantes pueden estar por debajo de las concentraciones nocivas para la salud humana, sin embargo, factores geológicos y geoquímicos contribuyen a la liberación de estos contaminantes durante diferentes tipos de actividades geológicas (Briceño Polo, 2019).

Durante las actividades volcánicas del 3 de junio de 2019 en el volcán de Fuego, los vecinos de las aldeas Panimaché I y II del municipio de San Pedro Yepocapa, departamento de Chimaltenango - Guatemala, reportaron al Centro de Salud cambios en los parámetros organolépticos del agua que consumen (esta pasó a ser desagradable ante la percepción del consumidor). Esta condición obligó a tomar como medida la suspensión del servicio de suministro de agua y a plantearse cuál sería la razón del cambio tan drástico percibido del agua en la comunidad.

Derivado de lo anteriormente expuesto, se propone realizar una investigación que permita identificar la posible causa del deterioro de la calidad de agua de esta comunidad que se ubica muy cerca del volcán de Fuego.

Con base en esta acción se procedió a realizar a través de esta investigación una serie de monitoreos por medio de un fotómetro de campo, con el cual se midió durante ese periodo las concentraciones de Cloruros (Cl⁻), Fluoruros (F⁻), Sulfatos (SO₄⁻²), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Boro (B) y Arsénico (As) comparándolas con la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001.

Estudios similares al presentado acá se han desarrollado en el área de Centroamérica como el realizado en el Valle Central de Costa Rica, específicamente en la zona montañosa central que está compuesta por dos valles inter montanos al este y oeste de la Cordillera Volcánica Central. En este estudio se analizó la composición química del agua subterránea cercana a la zona volcánica. En el caso de los Nitratos, se encontró una mediana de 0.2 mg/l de NO₃-N en el sector de mayor altitud de donde surgió la hipótesis que estos parámetros pueden ir en aumento en el acuífero, en la medida que el agua entra en contacto con distintos estratos geológicos (Madrigal Solís et al., 2017).

Los estudios realizados por Bécher Quinodóz y Blarasin (2016) demostraron que las características geomorfológicas del área estudiada participan en el control de aspectos hidrodinámicos y pueden influir en las propiedades hidro químicas del acuífero, con lo cual se evidencia la necesidad de considerar estos aspectos cuando se habla de la calidad de agua de fuentes subterráneas.

En la región centroamericana se tiene un estudio realizado en El Salvador en los pozos de abastecimiento de agua de industrias cercanas a la zona volcánica del municipio de Guadalupe, departamento de San Miguel, el cual determinó la calidad de agua de estos posterior a eventos volcánicos para determinar si las concentraciones de Arsénico, Mercurio, Plomo, Cloruros y Sulfatos superan la norma salvadoreña obligatoria para la calidad de agua potable, encontrando que posterior al evento, las concentraciones de estos parámetros se mantienen dentro de dicha norma salvadoreña (Salgado Majano & Villatoro Bolainez, 2014).

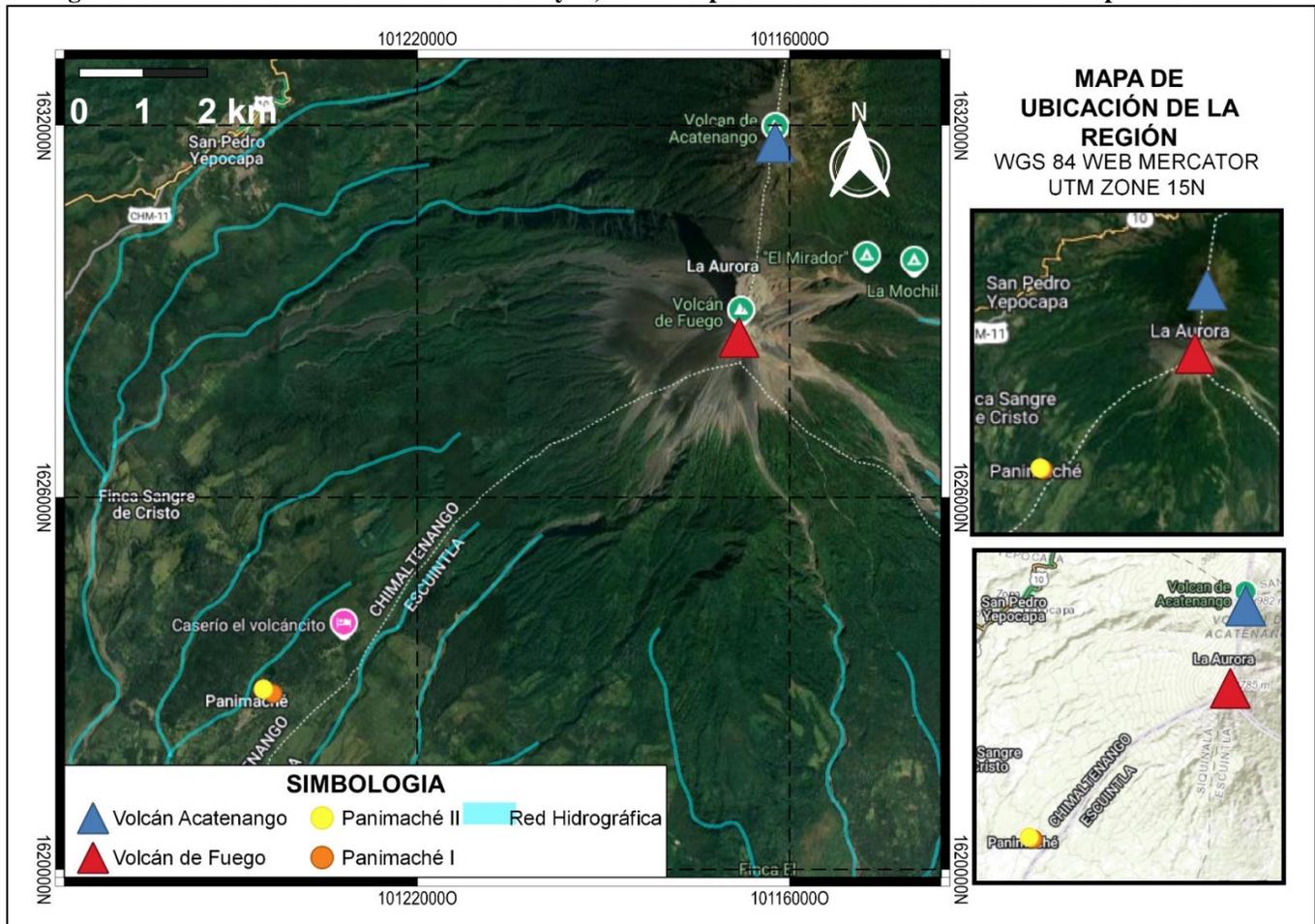
El deterioro de la calidad de agua que utilizan las aldeas Panimaché I y II puede tener su origen en la

disolución de minerales contenidos en la roca del acuífero o por infiltración de contaminantes en el área, al ser un acuífero de porosidad secundaria.

En la figura 1, se muestra la ubicación de las aldeas Panimaché I y II, observándose su cercanía con el Volcán de Fuego.

Las coordenadas geográficas del punto donde se realizó la toma de muestras para el análisis de calidad de agua de esta investigación son latitud 14°26'34.14"N y longitud 90°56'56.59"O denominado manantial Los Panimaches a 10 kilómetros aproximadamente del cráter del Volcán de fuego.

Figura 1. Ubicación de las aldeas Panimaché I y II, así como punto de toma de muestra utilizado para el estudio.



La Geomorfología donde se localizan estas comunidades pertenece a una unidad de Gran Paisaje conocida como Volcán de Fuego y Acatenango, la cual presenta las siguientes características:

- Ubicación y localización: la parte este corresponde a Sacatepéquez, la parte oeste a Chimaltenango y la parte sur a Escuintla.
- Tipo de roca: En estos conos volcánicos se encuentra todo tipo de rocas, principalmente andesitas. Hay lavas, aglomerados, lahares, flujos piroclásticos y cenizas volcánicas (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [MAGA], 2021).
- Morfogénesis: Al parecer, estas estructuras volcánicas son el resultado de una salida del magma producto de los materiales que se consumen en el choque de las placas del Caribe y Cocos en la zona de subducción, por lo que se encuentra activo actualmente y ha generado flujos lávicos recientes hacia el sur. La forma de la unidad como un todo es el resultado del cúmulo de rocas volcánicas de diferentes tipos. La erosión únicamente ha tomado parte en el modelado del sistema de drenaje, el que presenta un patrón de drenaje de tipo radial (MAGA, 2001).

Materiales y método

El presente estudio es de tipo cuantitativo exploratorio, toda vez que busca observar la posible causa del deterioro de la calidad de agua percibida por los pobladores de las comunidades Panimache I y II del municipio de San Pedro Yepocapa, departamento de Chimaltenango.

El proceso metodológico incluyó trabajo de gabinete, el cual está considerado en una fase inicialmente de recopilación de información, así también en la fase final que consistió en el análisis de datos y redacción del informe.

Para la selección de parámetros a monitorear se analizó que los solutos disueltos (Calcio, Arsénico, Hierro, Manganeseo, Sulfatos, Mercurio, Cobre, Fluoruros, Cloruros, entre otros) que se encuentran en

las aguas subterráneas se originan por distintos factores derivados de las precipitaciones en distintas temporalidades, por meteoros atmosféricos y reacciones orgánicas e inorgánicas que suceden en los suelos al interactuar con el agua, así como por la meteorización del medio poroso y los aportes de las actividades antropogénicas (Appelo & Postma, 2005).

En esta investigación se propuso el monitoreo de las concentraciones de: Cloruros (Cl⁻), Fluoruros (F⁻), Sulfato (SO₄²⁻), Manganeseo (Mn), Hierro (Fe), Boro (B) y Arsénico (As) en el agua que consumen las comunidades Panimache I y II.

Con el objetivo de dar certeza al estudio exploratorio que se realiza, se determinó una muestra utilizando la fórmula de poblaciones finitas ya que se conocen cuantos elementos posee la población total, que en este caso es el único manantial para evaluar y poder obtener los parámetros de contaminación que tengan comportamientos variables.

Para determinar el universo y luego estipular el tamaño de la muestra a partir de la suposición que la población presenta una varianza máxima mientras que se desconoce el tamaño de la muestra representativa de esa misma población. Por lo que, el tamaño de la muestra se calculó utilizando un nivel de significancia del 5 % y un margen de error del 10 %, utilizando la ecuación 1 mostrada a continuación.

$$n = \frac{Z^2 * p * q}{d^2} \quad (1)$$

Donde:

Z: Nivel de confianza estándar al 95 %:	1.96
p: probabilidad del éxito al 95 %:	0.95
q: probabilidad del fracaso 5 %:	0.05
d: error de estimación del 10 %:	0.10

Sustituyendo se obtiene la ecuación 2:

$$n = \frac{1.96^2 * 0.95 * 0.05}{0.10^2} = 18.24 \quad (2)$$

Con base en lo anterior, se obtiene que se deben realizar 18.24 muestras, por lo que se optó por realizar 18 muestreos, los cuales fueron realizados en fechas a conveniencia, para garantizar la seguridad de poder acceder al manantial, y al azar durante 12 meses para

analizar muestras durante la época seca como en la época lluviosa.

Proceso de toma de muestras

Las muestras fueron captadas en recipientes de plástico limpios, los cuales sirvieron para conservar la muestra durante la medición de campo realizada.

Para el análisis de las muestras se utilizó un fotómetro multiparámetro compacto que permitió realizar la determinación de los parámetros analizados en campo.

Resultados

En la tabla mostrada a continuación se presentan los resultados obtenidos producto de las 18 muestras analizadas. Para cada una de las muestras se presenta en las columnas los 7 parámetros analizados, siendo estos: 1) Arsénico (As); 2) Boro (B); 3) Cloruros (Cl-); 4) Fluoruros (F-); 5) Hierro (Fe); 6) Manganeseo (Mn); y 7) Sulfato (SO₄²⁻).

Se debe observar que los valores menores a 0.010 miligramos por litro son valores por debajo del límite inferior de medición del equipo utilizado de acuerdo con sus características técnicas, situación que se observa con los datos de Arsénico (As), Cloruros (Cl-), Fluoruros (F-), Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn), exceptuando la muestra 6, 8 y 9 de Hierro y la muestra 6 de Manganeseo que si presentaron un valor por arriba del límite de detección del equipo utilizado.

Tabla 1: Dosis óptima para cada rango de concentración catión o anión analizado

No.	As	B	Cl-	F-	Fe	Mn	SO ₄ ²⁻
1	<0.010	0.200	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	1.000
2	<0.010	0.150	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	1.250
3	<0.010	0.170	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	1.350
4	<0.010	0.260	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	1.390
5	<0.010	0.110	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	1.340
6	<0.010	0.330	<0.010	<0.010	0.170	0.110	35.750
7	<0.010	0.200	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	126.750
8	<0.010	0.150	<0.010	<0.010	0.260	<0.010	158.100
9	<0.010	0.150	<0.010	<0.010	0.320	<0.010	93.400
10	<0.010	0.170	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	5.500
11	<0.010	0.420	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	3.470
12	<0.010	0.220	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	3.450
13	<0.010	0.200	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	11.010
14	<0.010	0.150	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	2.450
15	<0.010	0.170	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	136.450
16	<0.010	0.200	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	169.800
17	<0.010	0.250	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	142.600
18	<0.010	0.420	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	158.300
*LMP	0.010	0.300	250.00	1.500	***0.300	0.400	250.00
* Límites Máximos Permisibles establecidos en la Norma Técnica COGUANOR 29001							
** Límites no establecidos en la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001							
*** Límite Máximo Admisible							

Los datos de Boro y Sulfato fueron sometidos a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, obteniéndose una significancia menor a 5%, por lo que estos no cumplen con el criterio de normalidad. La mediana para la concentración de Boro fue de 0.20 miligramos por litro, la concentración máxima de 0.42 miligramos por litro y la mínima de 0.11 miligramos por litro.

La mediana obtenida para el Sulfato fue de 8.255 miligramos por litro, la concentración máxima obtenida es de 169.80 miligramos por litro y la mínima de 1.00 miligramo por litro.

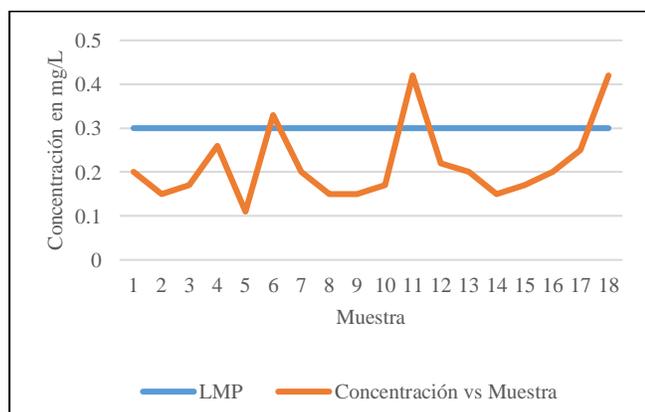
Discusión de resultados

Los únicos datos de los parámetros monitoreados que presentaron variaciones medibles fueron las de Sulfato (SO_4^2) y la de Boro (B).

Aplicando la prueba de contraste de hipótesis (Prueba de Wilcoxon) para la mediana de los datos obtenidos de Boro para compararla con el límite máximo permisible (LMP) establecido en la Norma Técnica COGUANOR 29001 de Guatemala con valor de 0.30 miligramos por litro, se obtiene que la mediana de Boro es significativamente diferente a 0.30, por lo que la concentración de Boro se encuentra por debajo del valor establecido en la norma guatemalteca.

En la figura siguiente se muestra el comportamiento de la concentración de Boro en las mediciones realizadas en este estudio y su relación con el límite máximo permisible (LMP) de la norma COGUANOR 29001 de Guatemala.

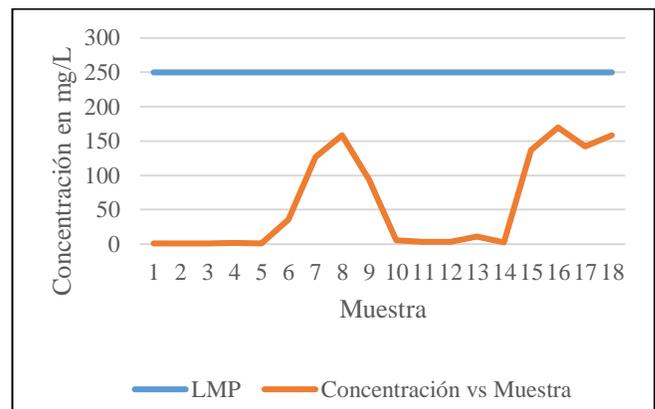
Figura 2. Comparación de los datos de concentración de Boro obtenidos en el estudio con el LMP de la norma COGUANOR 29001.



Aplicando la prueba de Wilcoxon para comparar la mediana de los datos de Sulfato con el LMP de la norma guatemalteca COGUANOR 29001 de 250 miligramos por litro, se obtiene que, si existe una diferencia significativa entre la mediana de Sulfato con relación al valor de la norma, por lo que los datos obtenidos se encuentran significativamente por debajo del valor establecido en la norma COGUANOR 29001.

En la figura 3 se muestra el comportamiento de los datos de concentración de Sulfato comparado con el LMP de la norma COGUANOR 29001, observándose que ninguno de los datos obtenidos supera el LMP establecido en la norma guatemalteca.

Figura 3. Comparación de los datos de concentración de Sulfato obtenidos en el estudio y su comparación con el LMP de la norma COGUANOR 29001.



La concentración de Sulfatos tuvo variaciones que podrían tener relación con actividades volcánicas, sin embargo, no se tiene suficiente información volcánica que podría relacionar esta concentración hidro química con actividad volcánica y tampoco se tiene información de la superficie para relacionar esta concentración a posible lixiviación de lluvia ácida, únicamente se tienen los valores del muestreo de calidad de agua obtenidos en esta investigación.

Los datos obtenidos para sulfato muestran en las muestras 7, 8, 9, 15, 16, 17 y 18 valores bastante superiores al resto de muestras (ver tabla 1 y figura 2), lo cual puede ser la razón del deterioro de la calidad de agua reportada por los vecinos del área, a pesar que ninguna de las muestras obtenidas supera el Límite Máximo Permisible establecido en la Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR 29001, sin embargo estas

diferencias de concentración de valores bajos de 1 miligramo por litro a valores altos de 169.80 si pueden ser percibidas por las personas que no están acostumbradas a estos valores elevados.

Otro aspecto importante es el comportamiento del potencial de hidrógeno, el cual según los registros obtenidos cuando existió actividad volcánica se evidenció una baja en su valor en relación con los valores normales de estas fuentes de agua, lo cual puede estar relacionado con la acidificación por Sulfatos.

En relación con el comportamiento del Boro este fue variable, y en el caso de las muestras 6 y 18 supera el LMP establecido en la norma COGUANOR 29001.

La variación de la concentración de Manganeseo tuvo una variación en la muestra número 6, donde el resultado fue medible gracias a que fue mayor al rango mínimo de medición del equipo utilizado, sin embargo, durante las visitas al punto de toma de muestra, se observó rastros de Manganeseo en el cauce de algunos ríos locales que también abastecen a comunidades en las faldas del Volcán de Fuego.

La variación de la concentración de Hierro tuvo variaciones en tres muestras, sin embargo, al igual que el Manganeseo y el Boro, no se puede establecer una conexión directa con actividades volcánicas, aunque al igual que el Mn, existen rastros de Fe en los cauces de los principales ríos que abastecen con dirección a Santa Lucía Cotzumalguapa, departamento de Escuintla.

Es importante indicar que este estudio obtuvo resultados similares a los obtenidos por Salgado Majano y Villatoro Bolainez (2014), en el sentido que la calidad de agua de los parámetros monitoreados en ambos estudios se mantuvieron dentro de la normativa de país para agua de consumo humano, con lo cual se podría indicar que si bien es cierto que la actividad volcánica puede tener un efecto sobre las variaciones de calidad observadas, no llega a ser lo suficiente como para hacer que el agua exceda los límites permitidos en las normas de país.

Conclusiones

Con base en la tabla 1 y en la discusión de Resultados, se tiene que, de los 7 parámetros analizados, 4 presentaron variaciones, sin lograr correlacionar directamente dichas variaciones con

actividades volcánicas, lixiviación o infiltración de lluvia ácida por la falta de información vulcanológica e hidrogeológica del área. Sin embargo, se tienen muestras donde se observan picos al graficar la información obtenida durante los análisis.

De igual forma, el presente estudio, presenta información acerca de los parámetros de monitoreos realizados en el punto de interés para garantizar la calidad de la fuente de agua para los consumidores locales, pudiendo servir como una línea base para un plan de monitoreo de agua en zonas volcánicas para las autoridades locales y estatales, ya que llegan a presentarse concentraciones de metales pesados (como el Boro) superando el Límite Máximo Permisible.

Determinar los parámetros hidrogeológicos locales con relación al manantial en orden de poder establecer un sistema de seguridad para el manantial dada la importancia (abastece alrededor de 5,000 personas), por lo que se recomienda la caracterización isotópica local para determinar las zonas de recarga hídrica con mayor grado de certeza para la concentración de Sulfatos en el agua; además del permanente monitoreo de la actividad del Volcán de Fuego para poder obtener el registro de actividades y tipo de actividades volcánicas y determinar el efecto que puedan tener en las concentraciones de metales pesados tal es el caso del Hierro, el Manganeseo y el Boro.

Continuar con el monitoreo de los Sulfatos, Hierro y Boro; ya que son los elementos que presentan mayores variaciones con similares periodos de monitoreo estando el Boro comprobado por la Organización Mundial de la Salud, tener cierto nivel de embriotoxicidad, siempre y cuando la ingesta permanezca menor que la ingesta diaria tolerable (Organización Mundial de la Salud -OMS-, 2011).

Si bien es cierto que en este estudio los parámetros monitoreados cumplen con el LMP establecido en la norma guatemalteca COGUANOR 29001, algunos parámetros puntuales sobrepasan este LMP y en otros casos existen incrementos representativos que pueden ser la causa del rechazo del agua por parte de los comunitarios que están acostumbrados a valores bajos de estos parámetros, por lo que debe considerarse estos aspectos en los procesos de control de calidad de la fuente de abastecimiento de agua de estas comunidades.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado con recursos propios del autor.

Conflicto de interés

El autor declara no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Hernández Aviles, S.F (2023). Análisis de la calidad de agua en manantiales volcánicos para abastecimiento de agua para consumo humano. *Agua, Saneamiento & Ambiente*, 18(2), Artículo e1540. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v18i1.1540>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Conceptualización, trabajo de campo, tabulación, análisis y escritura: S.F.H.A

maestría en hidrología y gestión de recursos hídricos, Universidad de Alcalá].

<http://hdl.handle.net/10017/45288>

Salgado Majano, V.E., & Villatoro Bolainez, L.A. (2014). *Estudio de la calidad del agua subterránea por efecto de la actividad volcánica en los pozos del municipio de Nueva Guadalupe, departamento de San Miguel*.

[Tesis de licenciatura en Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad de El Salvador].

<https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/17205/>

Bécher Quinodóz F.N., & Blarasin, M.T. (2016). Evaluación de relaciones geomorfológicas – calidad de agua subterránea mediante técnicas estadísticas y modelación numérica en la planicie arenosa del sur de Córdoba, Argentina. *Geoacta*, 41(2), 1-16.

<http://www.scielo.org.ar/pdf/geoacta/v41n2/v41n2a01.pdf>

Referencias

- Appelo, C.A.J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution (2nd ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439833544>
- Custodio, E., & Llamas, R. (1996). *Hidrología subterránea*. Universidad Politécnica de Barcelona. (2ª ed. corr). Omega.
- Madrigal Solís, H., Fonseca Sánchez, A & Reynolds Vargas, J. (2017). Caracterización hidrogeoquímica de los acuíferos volcánicos Barva y Colima en el Valle Central de Costa Rica. *Tecnología y ciencias del agua*, 8(1), 115-132. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-01-09>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2001). *Mapa fisiográfico-geomorfológico de la República de Guatemala a escala 1:250,000*. [Informe]. Con el apoyo de G. D. Alvarado Cabrera & I. R. Herrera Ibañez. <https://www.maga.gob.gt/download/fisiografia.pdf>
- Organización Mundial de la Salud -OMS-. (2011). *Guía para la calidad del agua potable*. Santiago de Chile.
- Briceño Polo, A. (2019). *Contaminación geogénica en las aguas subterráneas de España*. [Tesis de